

УДК 614.8

С.Я. Кравців, студентка, НУЦЗУ,  
О.П. Сознік, д-р фіз.-мат. наук, професор, НУЦЗУ

## ТЕПЛОВИЙ ПОТІК ВІД ФАКЕЛУ ПОЛУМ'Я ЛІСОВОЇ НИЗОВОЇ ПОЖЕЖІ З ВРАХУВАННЯМ ЙОГО СКІНЧЕННИХ РОЗМІРІВ І ВІТРУ

Проведено розрахунки густини теплового потоку від полум'я лісової пожежі для запропонованої реалістичної форми факела з врахуванням його нахилу під дією вітру. Показано, що максимальне значення потоку суттєво залежить від ширини і нахилу факела.

**Ключові слова:** лісова низова пожежа, тепловий потік, кутовий коефіцієнт випромінювання.

**Постановка проблеми.** В наш час запропоновано велику кількість математичних моделей для визначення швидкості розповсюдження фронту низової лісової пожежі. Всі ці моделі мають різні степені складності, що залежить від степені деталізації процесів передачі тепла від полум'я лісному горючому матеріалу (ЛГМ) і явищ, що відбуваються в ЛГМ під дією переданого тепла. Визначення швидкості руху фронту можна розбити на дві взаємозв'язані задачі: знаходження значень теплового потоку від факелу полум'я і на основі значень горючості і загоряння ЛГМ [1,2] знаходження швидкості горіння і розповсюдження полум'я [3-7]. Знайдені величини швидкості можна використовувати для обчислення контурів пожежі, знання яких визначає тактику гасіння лісової пожежі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В [3] задачу розповсюдження пожежі розглянуто в моделі, яка ґрунтується на розв'язку рівнянь гідродинаміки, знайти які в наш час вдалося тільки в окремих випадках при значних спрощеннях. В роботах [4-7] проведено аналіз різних емпіричних і напівемпіричних виразів для швидкості розповсюдження фронту полум'я. В [6] для оцінки швидкості розповсюдження фронту пожежі розглянута модель, в якій факел полум'я мав форму похилої пластини скінченої довжини  $L$ , яка випромінює як сіре тіло. В результаті було отримано простий вираз для густини теплового потоку. В [7] задачу випромінювання розглянуто для вертикальної пластини висотою  $h$  і нескінченної довжини.

**Постановка задачі та її вирішення.** Відомо [1,3,5], що фронт пожежі має скінчену ширину  $\Delta$  на поверхні горіння. При цьому форму факелу можна в поперечному перерізі представити у вигляді рівнобедреного трикутника з основою  $\Delta$  і висотою  $h$ . Така форма відпо-

відає розповсюдження пожежі на рівнинній місцевості в безвітряну погоду. При наявності нахилу поверхні горіння факел має нахил до поверхні розповсюдження, який можна описати кутом  $\alpha$  відхилення від вертикалі, а при наявності вітру факел також відхиляється від вертикалі на кут  $\alpha$ , який визначається виразом [3]

$$\operatorname{tg}\alpha = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot V_B^2}{g \cdot \Delta}}, \quad (1)$$

де  $V_B$  - швидкість вітру (м/с),  $g=9,8$  м/с<sup>2</sup>, а ширина  $\Delta$  залежить від  $V_B$ . При  $V_B=2$  м/с в [3] наведено значення  $\Delta=1,5$  м, яке здається з погляду на інші джерела занадто великим. В свою чергу висота  $h$  наближено пропорційна  $\sqrt{I}$  [8], де  $I$  - інтенсивність тепловиділення з одиниці крайки в одиницю часу. В [8] величину  $\Delta$  визначають через швидкість розповсюдження  $v$  крайки пожежі як  $\Delta = v \cdot \tau$ , де  $\tau$  - постійна часу горіння.

Нами проведено обчислення густини теплового потоку  $q$  від факела при скінчених значеннях  $\Delta$  і  $\alpha \neq 0$ . Як і в [7] виходимо з відомого виразу

$$q = \varepsilon \cdot c_0 \cdot [T_1^4 - T_0^4] \cdot 10^{-8} \cdot \Psi, \quad \Psi = \frac{1}{\pi} \iint_{(S)} \frac{(\vec{r}, \vec{N}_1)(\vec{r}, \vec{N}_2)}{r^4} d^2S, \quad (2)$$

де  $\varepsilon$  - приведена степінь чорноти факелу і поверхні ЛГМ,  $c_0=5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) – постійна Стефана-Больцмана,  $T_1$  і  $T_0$  – температури поверхонь полум'я і ЛГМ, відповідно,  $\Psi$  - локальний кутовий коефіцієнт,  $\vec{N}_1$  і  $\vec{N}_2$  - одиничні вектори нормалей до поверхонь випромінювання і приймання,  $\vec{r}$  - визначає відстань від елемента  $dS$  поверхні випромінювання до поверхні ЛГМ, а інтегрування здійснюється по всій поверхні випромінювання.

Для обчислення величини  $\Psi$  нами пропонується модель факелу, схему якого наведено на рис.1 у вигляді трикутника ABC. Довжина факелу  $l = OA$ ,  $\alpha$  - кут відхилення факелу від вертикалі під дією вітру, напрямком якого збігається з віссю Oz, ширина факелу при  $y=0$  дорівнює  $\Delta = BC = 2d$  ( $CO = OB$ ). Тоді висота факелу  $h = OK = l \cos \alpha$ , а вектор  $\vec{r} = \vec{EF}$ , величина  $OG = \delta$  визначає висоту розташування елемента поверхні ЛГМ, кут нахилу який дорівнює  $\beta$ .

В такій геометрії маємо  $\vec{N}_2 = (0, \cos\beta, -\sin\beta)$ . Виходячи з координат точок  $A(x, h, \text{htg}\alpha)$  і  $B(x, 0, d)$ , можна написати рівняння прямої  $AB$  і знайти вектор нормалі  $\vec{N}_1 = (0, d - \text{htg}\alpha, h)$  і координати довільної точки  $E(x, y, \chi y + d)$ , яка належить відрізку  $AB$ , де  $\chi = (\text{htg}\alpha - d)/h$ . Враховуючи координати точки  $F(0, \delta, z)$ , знаходимо вектор  $\vec{r} = (x, y - \delta, \chi y + d - z)$ .

Врахуємо, що в розглядуваній геометрії  $d^2S = dx dy$ . Тоді скалярний добуток  $(\vec{r}, \vec{N}_1) = -(z - d - \chi\delta)$  не залежить від змінних інтегрування, а  $r^2 = x^2 + a^2$ ,  $(\vec{r}, \vec{N}_2) = by + c$ ,  $a^2 = (y - \delta)^2 + (\chi y + d - z)^2$ ,  $b = \cos\beta - \chi \sin\beta$ ,  $c = (z - d)\sin\beta - \delta \cos\beta$ .

Підставляючи розраховані значення в (2), дістаємо

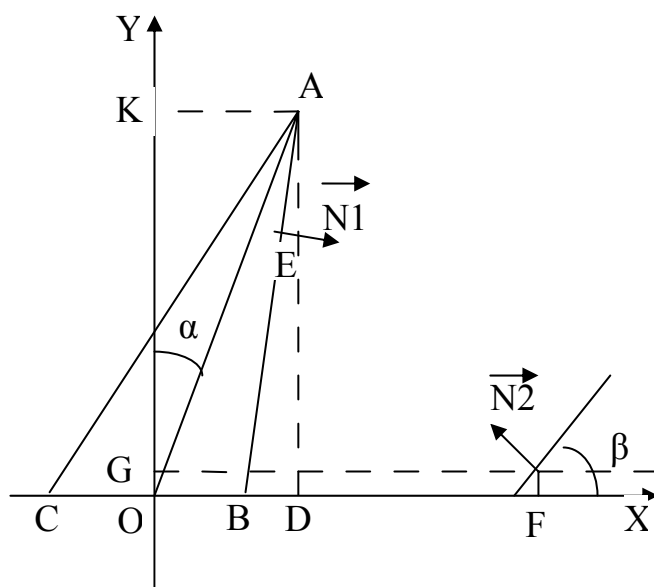


Рис. 1 – Схема до розрахунку кутового коефіцієнта випромінювання

$$\psi = -\frac{(z - d - \chi \cdot \delta)}{\pi \cdot \sqrt{1 + \chi^2}} \int_{\delta}^h (by + c) dy \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{(x^2 + a^2)^2}. \quad (3)$$

Інтеграл в (3) по  $x$  обчислюється елементарно, після чого інтегрування по  $y$  стає тривіальним [9] і дає

$$\psi = \frac{1}{2\sqrt{1 + \chi^2}} [f(h) - f(0)], \quad (4)$$

$$f(h) = \frac{(h - \delta) \sin \beta - (z - d - \chi \cdot h) \cos \beta}{\sqrt{(h - \delta)^2 + (z - d - \chi \cdot h)^2}}$$

Отриманий вираз (4) для  $\psi$  разом з формулами (2) й розв'язує поставлену задачу знаходження густини теплового потоку в залежності від відстані  $z$ , яка залежить від швидкості розповсюдження фронту пожежі  $V_{\Gamma}$  [6], тому в (4) під  $z$  потрібно розуміти величину  $z - V_{\Gamma} \cdot t$ , де  $t$  - час. Відмітимо, що в окремому випадку, коли  $\Delta = \alpha = 0$  і  $\beta = \pi/2$  з (4) дістаємо вираз для  $\psi$ , який з точністю до позначень збігається з наведеним у [7].

Вирази (2) і (4) є придатними для знаходження критичної відстані  $z_{\text{кр}}$ , при якій забезпечується перехід низовій пожежі через розрив в шарі ЛГМ [7]. На відміну від [7] з (4) можна відшукати два значення для цієї величини, одне з яких відповідає напрямку вітру, а друге – проти вітру. Крім того, у випадку  $\beta = 0$  формули (5),(6) можна використати для аналізу процесів, що відбуваються у шарі ЛГМ під дією теплового потоку від факелу.

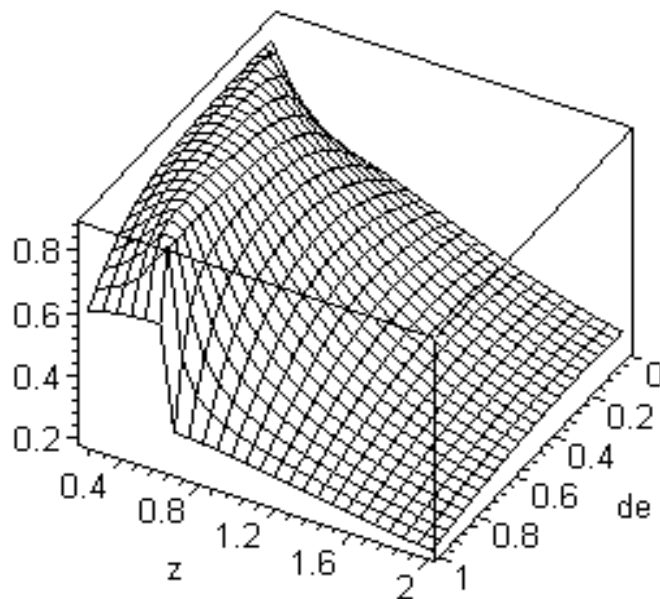


Рис. 2 – Залежність коефіцієнту опромінювання від ширини розриву  $z$  і висоти  $\delta$ .

В [7] для випадку  $d = \alpha = 0, \beta = \pi/2$  було показано, що максимальний потік тепла надходить на елемент ЛГМ, який розташований на висоті  $\delta = h/2$ . Із аналізу виразу (4) виходить, що при  $d \neq 0$  і  $\alpha \neq 0$  максимальне значення потоку буде у випадку коли кут  $\beta$  визначається рівністю  $\text{tg} \beta = \chi^{-1}$ .

Підставимо це значення у вираз (4), матимемо

$$\Psi = \frac{1}{2 \cdot (1 + \chi^2)} \left( \frac{h - \delta - \chi \cdot (z - d - \chi \cdot h)}{\sqrt{(h - \delta)^2 + (z - d - \chi \cdot h)^2}} + \frac{\delta + \chi \cdot (z - d)}{\sqrt{\delta^2 + (z - d)^2}} \right) \quad (5)$$

На рис.2 як приклад наведено результати розрахунків величини  $\Psi$  в залежності від  $z$  і величини  $\delta$  при  $h = 1$  м,  $\Delta = 0,2$  м і  $\alpha = \pi/6$ . З рис. 2 бачимо, що максимальне значення  $\Psi$  із зростанням  $z$  надходить на елемент ЛГМ, висота якого відрізняється від  $h/2$  і залежить від значень  $\Delta$  і  $\alpha$ . Аналіз показує, що в цьому разі максимум теплоти припадає на елемент ЛГМ на висоті  $\delta = h(1 + \chi^2)/2 - \chi \cdot z$  і залежить зокрема від  $z$ . Зазначимо, що при  $\Delta = \alpha = 0$  матимемо, як й в [7],  $\delta = h/2$ . Оскільки величина  $\delta$  повинна підкорятися нерівності  $\delta \geq 0$ , то із зростанням  $z$  максимальна кількість теплоти припадає на ЛГМ, висота розташування якого  $\delta = 0$  м.

**Висновки.** Проведений аналіз величини теплового потоку від факелу полум'я при низовій лісовій пожежі показує, що його значення залежить від ширини і кута нахилу факелу, а при зростанні відстані від нього максимальне кількість тепла надходить на елемент ЛГМ, розташованого нульовій висоті. Запропонована модель в подальшому використатиметься для визначення критичної відстані і швидкості розповсюдження пожежі.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов / Э.В. Конев – Новосибирск: Наука, 1977. – 239 с.
2. Свириденко В.Є. Лісова пірологія / В.Є. Свириденко, О.Г. Бабіч, А.Й. Швиденко.- К.: Агрпромовидав України, 1999. – 172 с.
3. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. - Новосибирск: Наука – 1992. 408 с.
4. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров / Г.А. Доррер – Новосибирск: Лесная промышленность, 1979. – 160 с.
5. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздейл - М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.
6. Абрамов Ю.А., Рева Г.В., Росоха В.Е., Чуковский В.Н. Идентификация моделей скорости распространения фронта лесного пожара и их практическое применение / Ю.А., Абрамов Г.В. Рева, В.Е. Росоха, В.Н. Чуковский // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Харьков. 2004. – 114 с.

7. Абрамов Ю.А. Влияние пространственных флуктуаций пирологических параметров среды на интегральные характеристики лесного пожара и условия его тушения / Ю.А. Абрамов, В.Е. Росоха, А.А. Тарасенко // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Харьков. 2004.-142 с.

8. Валендик Э.Н. Об интенсивности лесного пожара / Э.Н. Валендик, Р.В. Исаков // Прогнозирование лесных пожаров - Красноярск: СО АН СССР, 1978. –С. 40-55.

9. Градштейн И.С., Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик -М.: Физматгиз, 1962. -1100 с.

nuczu.edu.ua

С.Я. Кравцив, А.П. Созник

**Тепловой поток от факела пламени лесного низового пожара с учетом его конечных размеров и ветра.**

Проведен расчет плотности теплового потока от пламени лесного пожара для предложенной реалистичной формы факела с учетом его наклона под действием ветра. Показано, что максимальное значение потока существенно зависит от размеров и наклона факела.

**Ключевые слова:** лесной низовой пожар, тепловой поток, угловой коэффициент излучения.

S.Ya.Kravtsiv, A.P.Soznik

**Heat flow from the flame of the forest ground fire, taking into account its finite size and wind.**

The calculation of the heat flux from the flames of a forest fire for the proposed realistic form of the torch because of its slope under the action of the wind. It is shown that the maximum flux depends on the size and inclination of the torch.

**Keywords:** forest ground fire, heat flow, the slope of the radiation.